

고온용 Circuit-analog 전파흡수구조의 350°C 및 열 수분 환경에서의 적용성 평가

장민수* · 김호범* · 홍헌석*†

Evaluation of Applicability of Circuit-analog Radar Absorbing Structures for High Temperature in 350°C and Hot-wet Environment

Min-Su Jang*, Ho-Beom Kim*, Heon-Suk Hong*†

ABSTRACT: We proposed a high-temperature circuit-analog radar absorbing structures (CA-RAS), and evaluated radar absorption performance and tensile properties in 350°C and a hot-wet environment. The CA-RAS was implemented with a glass/cyanate ester composites and a square resistive pattern layer, and reflection loss was measured by 350°C and after exposure of hot-wet condition using free space measurement. And the tensile strength at 350°C and after exposure of hot-wet condition was measured according to the ASTM D638. The proposed CA-RAS showed a 4 GHz of -dB bandwidth and -20 dB of a peak value at 350°C. In addition, there was no deterioration in absorption performance after exposure to a hot-wet condition. The tensile strength value of more than 95% compared to the strength of the glass/cyanate ester composite was confirmed at 350°C and after exposure of hot-wet condition. Through this, the applicability of CA-RAS proposed in this study was confirmed as a load bearing structure for stealth weapon exposed to high temperature and hot-wet environment.

초 록: 본 연구에서는 고온용 Circuit-analog 전파흡수구조(CA-RAS)를 제안하고, 350°C 및 열 수분 환경에서의 전파흡수성능 및 인장 물성을 평가하였다. Glass/cyanate ester와 사각형 저항 패턴층을 통해 CA-RAS를 구현하였으며, 자유공간 측정장비를 이용하여 350°C 환경과 열 수분 환경 노출 후의 반사손실을 측정했다. 또한 ASTM D638 규격에 따라 환경 노출 후의 인장강도를 측정했다. 제안된 CA-RAS는 350°C까지 4 GHz 이상의 -10 dB 흡수 대역과 -20 dB 이상의 피크 값을 보였으며, 열 수분 환경 노출 후에도 전파 흡수 성능의 저하가 확인되지 않았다. 또한 환경 노출 후에도 Glass/cyanate ester의 상온 인장강도 대비 95% 이상의 인장강도 값이 확인되었다. 이를 통해 본 연구에서는 제안된 전파흡수구조의 고온 및 열 수분 환경에 노출되는 저피탐 구조물로서의 적용 가능성을 확인하였다.

Key Words: 고온용 복합재료, 전자파흡수구조, Circuit-analog 흡수체, 열 수분 환경

1. 서 론

섬유 강화 복합재료를 이용한 다기능 구조 중 하나로 전자파 흡수 구조(RAS, Radar Absorbing Structures)가 있다. RAS는 구조적 하중 지지 능력과 외부에서 입사되는 전자

기파를 흡수하는 기능을 갖는 구조이다. RAS는 섬유 또는 기지재료에 전자기파에 손실을 유발하는 재료를 사용하거나 저항성 층을 삽입하는 방법 등으로 구현된다. 이러한 RAS는 주로 낮은 레이더 반사 면적(RCS, Radar Cross Section)을 가져야 하는 스텔스 무기체계에 적용되는 것으로 알려져 있다.

Received 3 August 2023, received in revised form 4 September 2023, accepted 3 October 2023

*Agency for Defense Development

†Corresponding author (E-mail: honghs7@add.re.kr)

스텔스 무기체계에서 RCS 증가를 유발하는 부위는 흡입구와 같은 노즐부이다. 다양한 각도에서 노즐부로 입사되는 전자기파는 다중 반사를 통해 노즐 방향으로의 반사 신호로 작용하여 RCS를 크게 증가시킨다. 따라서 노즐 내부 및 주변부에서의 RCS를 줄이는 것이 무기체계 전체의 RCS 감소에 효과적이다. 하지만 일반적으로 노즐부는 300°C 이상의 고온 환경이기 때문에 현재까지 연구된 에폭시 기반의 RAS의 적용이 어렵다. 또한 무기체계의 비행 속도 증가로 공력 가열 현상에 대한 대응 필요성이 증가하고 있다. 따라서 300°C 이상의 고온 환경에서 적용 가능한 고온용 RAS에 대한 연구가 필요한 상황이다. 또한 우리나라는 사계절이 뚜렷한 기후 특성과 3면이 바다로 둘러 쌓인 지리적 특성을 가지고 있다. 이 때문에 다양한 열 수분 환경에 노출될 가능성이 높다[1]. 이처럼 항후의 스텔스 무기체계에 RAS를 적용하기 위해서는 300°C 이상의 고온 환경과 열 수분 환경에서의 적용 가능성에 대한 검증이 필요한 상황이다.

기존의 고온 환경에서의 전자파 흡수체에 대한 연구는 주로 세라믹 재료를 이용하거나 고온 환경에서 전자파 특성에 초점을 맞추고 있다[2-6]. 하지만 고온용 RAS의 구현을 위해서는 구조물로 사용될 수 있는 소재와 기계적 물성에 대한 연구가 필요하다. 또한 기존 복합재료의 열 수분 환경에 대한 연구에서는 일반적인 섬유강화 복합재료의 연구가 진행되어오고 있지만 전자파흡수구조의 열 수분 환경에 대한 연구는 제한적으로 수행되어 왔다[7-10].

따라서 본 연구에서는 300°C 이상에서 적용 가능한 고온용 RAS를 제안하고, 고온 환경 및 열 수분 환경에서의 적용성을 평가하였다. 먼저 Cyanate ester 기반의 유리섬유강화 복합재료를 이용하여 Circuit-analog (CA) 타입의 고온용 RAS를 구현하였다. 구현된 고온용 RAS의 350°C 환경에서의 전자파 흡수 성능과 기계적 물성 평가를 수행하였다. 또한 Mil-STD-810H 규격에 따라 열 수분 환경 노출 시험을 수행하고, 전자파 흡수 성능과 기계적 물성을 평가하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 고온용 RAS의 고온 및 열 수분 환경에서의 전자파 흡수 성능과 구조적 건전성을 검증하였고 적용 가능성을 확인했다.

2. 방 법

2.1 Circuit-Analog 흡수체의 설계 및 제작

본 연구에서는 설정된 주파수 대역에서 -10 dB 흡수 성능을 갖는 CA 타입의 RAS(이하 CA-RAS)를 설계했다. CA-RAS는 표면의 주기 패턴 저항층, 스페이서, 완전도체층으로 구성된다. CA-RAS는 자유공간의 임피던스와 매칭되는 주기 패턴 저항층을 완전도체층으로부터 1/4 파장 공간에 둬으로써 입사파와 반사파의 상쇄를 통해 전파를 흡수하게 된다. 이와 같은 정합형 흡수체의 반사 손실은 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

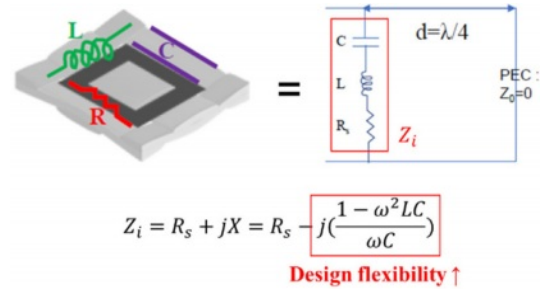


Fig. 1. Transmission line of circuit-analog pattern

$$\Gamma = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (1)$$

여기에서 Z_i 는 표면 저항층의 임피던스이고, Z_0 는 자유공간의 특성임피던스(=377 ohm/sq)이다. 따라서 표면저항층만을 이용하는 Salisbury 흡수체의 경우에는 표면 저항을 377 ohm/sq로 설정한다. 본 연구에의 CA타입의 경우 저항성 패턴을 조절하여 임피던스 값을 377 ohm/sq로 조절한다.

이 때 저항성 패턴의 Fig. 1과 같이 표면저항, 선폭, 패턴 간의 간격은 고주파 환경에서 각각 회로의 저항, 캐패시터, 인덕턴스 성분으로 작용하게 된다. 그리고 패턴의 표면 저항과 형상을 조절하여 공기의 임피던스와 매칭시킨다. 주기 패턴의 캐패시턴스와 인덕턴스 성분은 주파수에 의존적인 성분이다. 이러한 주파수 의존적인 캐패시턴스와 인덕턴스 성분을 이용하여 임피던스를 조절할 경우, 주파수에 따른 높은 설계 자유도로 흡수 대역을 넓힐 수 있는 장점이 있다[11].

이 때 캐패시턴스, 인덕턴스는 서로가 서로에게 영향을 미치는 기생성분이기 때문에 복잡한 계산이 필요하다. 따라서 최근에는 향상된 SW들을 이용하여 원하는 대역에서 흡수 성능을 내는 패턴 설계가 수행되고 있다.

본 연구에서는 알테아사의 Feko를 이용하여 CA-RAS의 설계를 수행하였다. 패턴의 형상은 제작이 용이하고 설계 신뢰성이 높은 사각형 패턴을 사용하였다. 사각형 패턴의 설계 변수는 패턴의 표면저항, 패턴의 주기(p), 패턴 간의 간격(g), 스페이서의 두께로 설정하였다. 이 때 스페이서의 두께는 복합재료의 제작 공정을 고려하여 경화 시 단위 두께의 적층 개수(N)로 설정하였다. 최적화의 목표함수는 중심주파수에서 정합하며, 설정된 주파수 대역에서 -10 dB 흡수 성능을 내도록 설정하였다. 이 때 패턴 저항층의 보호를 위해 고온용 RAS 최외곽 층에 한 장의 GFRP 층을 추가하는 설계를 적용하였다. 패턴 설계 결과, Fig. 2와 같이 CA-RAS 설계가 도출되었다. 패턴의 표면저항 범위는 160~200 ohm/sq이며, 패턴의 길이는 $0.40\lambda_{\text{center}}$, 패턴 간의 간격은 $0.13\lambda_{\text{center}}$ 이고, 스페이서의 두께는 $0.11\lambda_{\text{center}}$ 이다.

저항성 패턴층의 제작은 폴리이미드 필름 기판에 저항성 카본 잉크 패턴 인쇄를 통해 수행되었다. 카본 잉크는 바

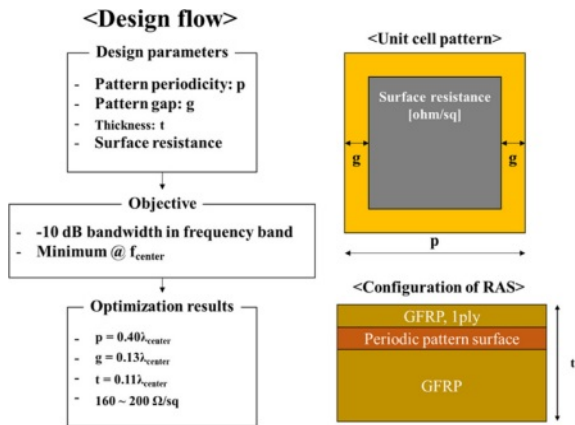


Fig. 2. Design parameters and flow of CA-RAS

인더 내에 전도성 카본 입자를 분산시킨 잉크가 사용되었다. 잉크의 조성을 조절하여 앞서 설계된 표면 저항 000 ohm/sq의 잉크를 제작하였으며, 실크스크린 인쇄방식을 이용하여 패턴을 인쇄되었다. 인쇄된 패턴은 310°C에서 2시간 동안의 열건조를 통해 고온 안정화 과정을 거친다. 이렇게 제작된 패턴은 350°C 노출 전후의 표면 저항 변화가 없음이 확인되었고, 열 안정성이 검증되었다.

스페이서 층은 구조적 하중지지 역할을 하며 표면층을 완전도체층으로부터 1/4 파장만큼 위치시키는 역할을 수행한다. 본 연구에서는 고온용 복합재료로 알려진 Glass/cyanate ester를 스페이서 재료로 사용하였다. 적층 순서는 설계 결과와 같이 [GFRP₀₀/저항층/GFRP₁]의 순서로 적층되었다. 1차 경화는 오토클레이브를 이용하여 135°C, 5 bar 조건에서 1시간 30분 동안 수행되었다. 2차 경화는 오븐을 이용하여 300°C에서 2시간의 경화 사이클을 거쳤다.

2.2 상온 및 고온 전자기 물성 측정

상온 및 고온에서의 복소유전율과 전파흡수 성능 평가는 고온용 챔버와 자유공간 측정 장비를 이용하여 수행되었다. 자유공간 측정장비는 Fig. 3과 같이 2개의 Focused horn 안테나와 Network analyzer (NA) 장비로 구성된다. NA 장비에서 발생된 전압 신호는 Focused horn 안테나를 통해 전자기파로 변환되어 시편에 방사된다. 방사된 신호를 이용하여 안테나에서의 S-parameter를 측정한다. S-parameter를 이용하여 전파 흡수 성능 평가와 복소유전율로 변환이 수행된다.

고온용 챔버는 시편을 고온환경에 노출시키는 장비이다. 장비 내부는 Fig. 4와 같이 가열봉, 온도측정센서, 시편 장착 치구로 구성된다. U자 형태의 가열봉은 시편 좌우 공간에 위치하여 대류 가열을 통해 시편을 가열시킨다. 전자기파가 투과되는 부분에는 단열이 가능한 전파 투과 윈도우로 구성된다. 이러한 고온용 자유공간측정법은 이전 연구를 통해 신뢰성이 검증된 2-Tier gated reflect line (GRL) calibration 및 Time gating 방법을 통해 오차를 최소화 하였

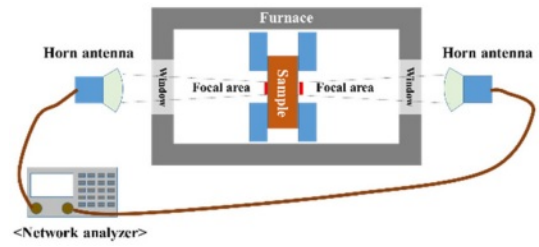


Fig. 3. Free space measurements system for high temperature environments

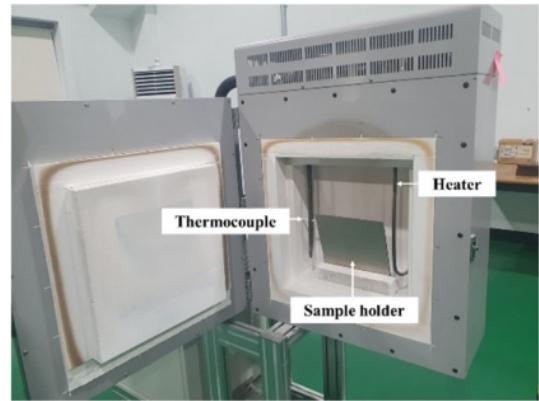


Fig. 4. Configuration of furnace

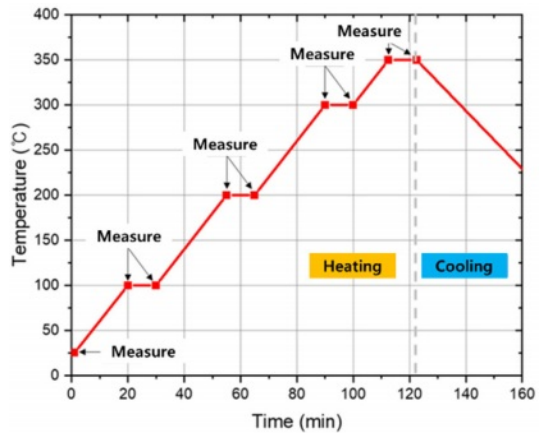


Fig. 5. Temperature profile and measurement points

다[12,13].

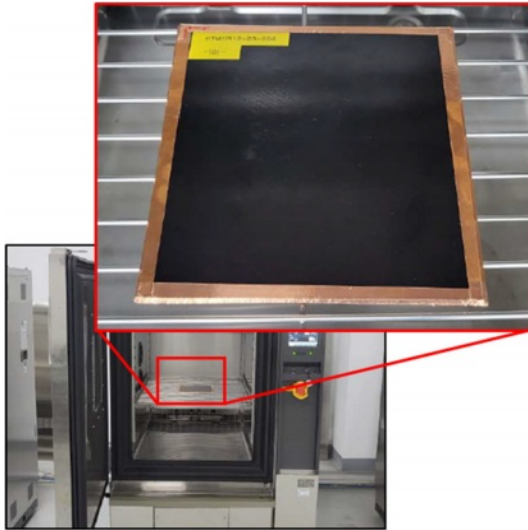
본 연구에서는 Fig. 5와 같이 100°C, 200°C, 300°C, 350°C의 온도에서 10분 동안 유지하며 전자기 물성의 평가가 이루어졌다. 승온 속도는 4°C/min이다. 목표 온도 도달 시점 및 10분 후의 전자기 물성이 평가되었다. 이를 통해 고온 환경에서의 Glass/cyanate ester 복합재료의 복소 유전율과 CA-RAS의 전자기파 흡수 성능이 측정되었다.

2.3 열 수분 시험

열 수분 시험은 ASTM D638과 MIL-STD-810H 규격에 Method humidity의 Procedure II - Aggravated cycle에 따라

Table 1. Aggravated cycle (1 cycle)

Time [h]	Temperature [°C]	Relative humidity [%]
0	30	95
2	60	
8	60	
16	30	
24	30	

**Fig. 6.** Configuration of hot-wet test and specimen

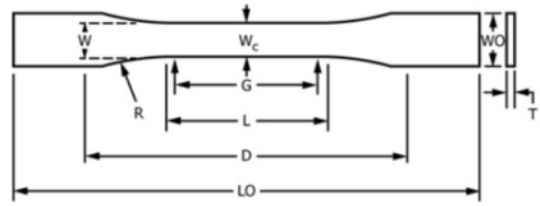
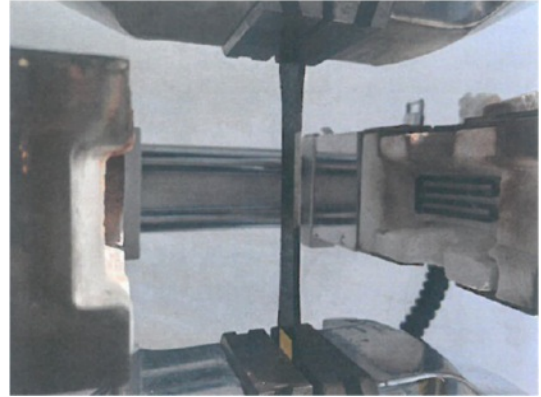
수행되었다[14,15]. Aggravated cycle은 짧은 주기 동안에 가혹한 열 수분 환경에 노출시키는 조건이다. 환경 시험 1사이클 및 조건은 Table 1과 같다. 온도 조건은 30°C에서 60°C로 2시간 동안 승온 시킨 후 6시간 동안 유지한다. 그리고 8시간 동안 30°C로 냉각시킨 후 8시간을 유지하는 것이 한 주기이다. 습도는 상대습도 $95 \pm 4\%$ 를 유지한다. 그리고 10일 동안 한 주기를 총 10회 반복한다.

측정 시편은 앞서 제작된 CA-RAS 시편을 이용하였다. 시편의 크기는 $200 \times 200 \text{ mm}^2$ 이다. ASTM D5229에 따라 시편 폭과 두께의 비율이 100 이하일 경우 시편 옆면을 통한 수분 침투 가능성이 있다[16]. 따라서 Fig. 6과 같이 시편의 옆면은 수분 침투를 막기 위해 금속 호일을 통해 보호되었다.

2.4 상온 및 고온 인장 물성 평가

인장 물성의 평가는 ASTM D638의 규격에 따라 수행되었다. ASTM D638의 규격에 따르면 Type 1 시편의 경우 섬유강화 복합재료의 인장시험이 가능하다. 따라서 Fig. 7과 같은 Type 1 시편 형상을 이용하여 인장 시험이 수행되었다.

고온용 인장 물성 평가 장비는 Fig. 8과 같이 만능재료시험기와 가열로로 구성된 장비이다. 가열로는 시편의 Gauge length에만 가열이 가능한 형태로 구성된다. 고온 인장 시

**Fig. 7.** Tensile specimen**Fig. 8.** High temperature tensile test equipment

험은 ASTM D618의 환경 조건에 따라 $350 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 설정되었다[17]. 온도는 가열로에서 측정되는 값과 시편에 부착된 열전대의 값의 평균을 이용하여 측정되었다. 승온 시간은 $60^\circ\text{C}/\text{min}$ 이다. 온도 상승 시에는 급격한 오버슈트가 발생되지 않도록 유의해야 한다.

인장 시험에 사용한 시편은 Glass/cyanate ester와 CA-RAS이다. Glass/cyanate ester 시편은 상온, 고온 환경에서 인장 시험이 수행되었다. 전파흡수구조는 열 수분환경 노출 전/후의 시편을 이용하여 상온 인장시험이 수행되었다. 본 시험을 통해 사용된 모 재료의 고온 인장 물성을 평가하였다. 그리고 전파흡수구조로 제작 후의 인장 물성이 비교되었다. 마지막으로 전자파흡수구조가 열 수분환경에 노출되었을 때의 인장 물성의 영향을 평가했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고온 전자기 물성

고온에서 Glass/Cyanate ester의 전자기 물성 변화를 파악하기 위해 자유공간 측정 장비를 활용해 온도에 따른 복소 유전율을 측정하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 온도에 따른 복소 유전율의 실수부, 허수부 결과를 보여준다.

측정 결과 중심주파수에서 상온, 100°C , 200°C , 300°C , 350°C 의 복소유전율은 4.57-0.07j, 4.61-0.08j, 4.69-0.10j, 4.76-0.13j, 4.82-0.15j이다. 상온에서의 복소유전율 값은 기존에 알려진 유리섬유 복합재료의 복소유전율 값과 유사하다. 따라서 기존의 Circuit-analog 방식의 전자파 흡수 구조로의

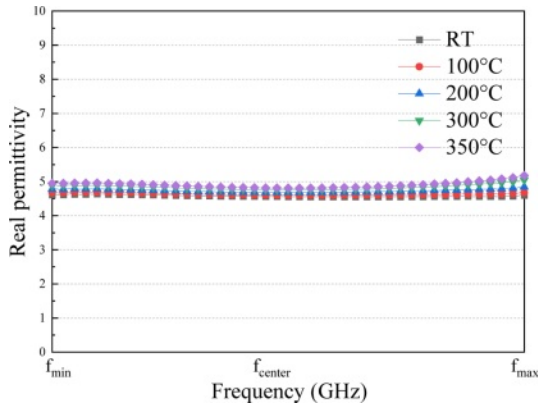


Fig. 9. Real permittivity of glass/cyanate ester composite

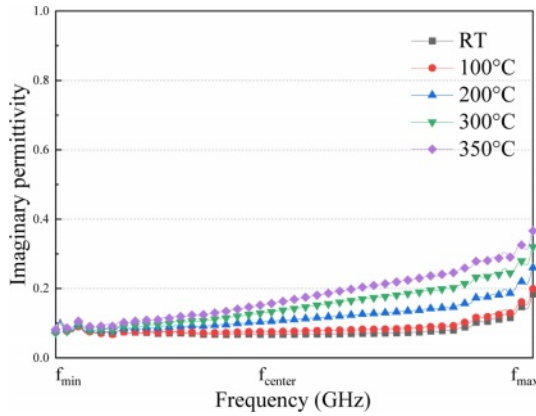


Fig. 10. Imaginary permittivity of glass/cyanate ester composite

구현이 적합하다.

복소유전율의 실수부와 허수부는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 확인된다. 이는 온도가 상승할 시 분자 내의 분극 완화속도가 감소하여 나타난 결과로 추정된다. Debye의 이론에 따르면 복소유전율의 실수부와 허수부는 다음과 같이 표현된다[18].

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau(T)^2} \quad (2)$$

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau(T)^2} \omega \tau(T) + \frac{\sigma(T)}{2\pi f \epsilon_0} \quad (3)$$

여기에서 ϵ_s 는 Static permittivity, ϵ_{∞} 는 제한 고주파에서의 유전율, ω 는 각주파수, τ 는 분극 완화시간, σ 는 전기전도도, ϵ_0 는 진공에서의 복소유전율을 의미한다. 이 때 τ 와 σ 는 온도에 종속적인 변수이다. 즉, 위의 이론에 따르면 복소유전율의 실수부와 허수부는 온도에 영향을 받는다. Arrhenius에 따르면 분극 완화 시간과 온도와의 관계를 아래의 식과 같이 표현된다[19].

$$\tau(T) = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

여기에서 T 는 온도, τ_0 는 Prefactor, E_a 는 활성화에너지, R 은 기체상수를 의미한다. 이 식에 따르면 온도가 증가할수록 분극 완화시간은 감소하며, 복소유전율의 실수부와 허수부는 증가한다. 특히 허수부는 전기전도도의 영향도 함께 받는다. 일반적으로 카본 잉크와 같은 저항체는 온도가 상승하면 재료 내의 자유전자의 이동성이 증가하기 때문에 전기전도도가 증가한다. 전기전도도의 증가는 복소유전율의 허수부를 증가시킨다.

3.2 고온 및 열 수분 노출 후 전자파 흡수 성능

CA-RAS의 온도에 따른 흡수 성능은 Fig. 11과 같다. 측정 결과 설정 대역에서 -10 dB 흡수 대역은 상온, 100°C, 200°C는 4.2 GHz이며, 300°C, 350°C는 각각 4.1 GHz, 4 GHz이다. 흡수 피크 값은 상온, 100°C, 200°C, 300°C, 350°C에서 각각 -30.3 dB, -26.8 dB, -23.6 dB, -21.8 dB, -20.2 dB이다.

전파흡수구조의 -10 dB 흡수대역과 피크 값의 위치는 온도가 상승함에 따라 저주파 쪽으로 이동하는 것이 확인된다. 또한 피크 값의 크기도 온도가 상승함에 따라 감소한다. 이러한 경향은 온도가 상승함에 전자파가 정합하는 조건이 달라졌기 때문이다. 앞선 결과와 같이 온도가 상승하면 복소유전율 값이 증가한다. 복소유전율의 증가는 매질 내의 파장 길이를 변화시키고, 이로 인해 정합하는 주파수가 달라진다.

비자성 재료($\mu = 1$)의 매질 내에서의 파장 길이는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon}} \quad (5)$$

여기에서 c 는 빛의 속도, f 는 주파수, ϵ 는 복소유전율을 의미한다. 이 때 전자파 흡수 구조의 설계 시 특정 주파수에서 정합하는 조건을 만족시키기 위해 매질은 1/4 파장 두께를 가져야 한다. 이 때 정합하는 주파수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

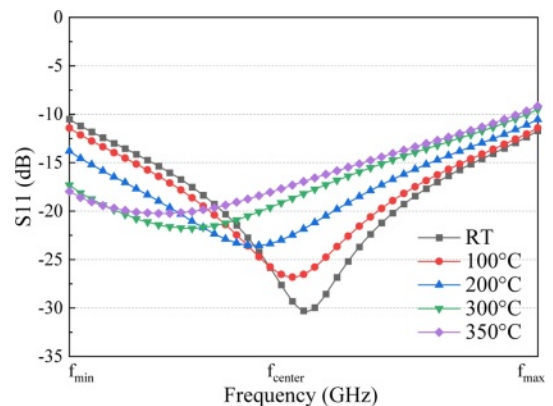


Fig. 11. Return loss of CA-RAS from room temperature to 350°C

$$t = \frac{\lambda_m}{4} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon}} \Rightarrow f = \frac{c}{4t\sqrt{\epsilon}} \quad (6)$$

위의 식에 따르면 정합하는 주파수는 복소유전율과 반비례 관계에 있기 때문에 복소유전율이 증가하면 정합하는 주파수가 저주파 쪽으로 이동하는 경향이 예상된다. 또한 온도 상승에 따른 저항 패턴의 표면 저항 감소는 저항층의 임피던스에 변화를 야기하고, 정합주파수의 변화 및 흡수 피크 값의 저하와 같은 영향을 초래한다. CA-RAS 표면층의 임피던스는 Fig. 1에 설명한 바와 같이 표면저항, 캐패시턴스, 인덕턴스 성분으로 구성된다. 이러한 성분들은 서로의 기생성분으로 표면저항의 변화는 유도전류를 변화시키고 캐패시턴스 및 인덕턴스에 영향을 준다. 따라서 온도 변화에 의해 패턴의 표면 저항이 변화하게 되면, 캐패시턴스와 인덕턴스 성분이 변화하여 표면층의 임피던스가 변화한다. 이 때 자유 공간의 입력 임피던스와 일치하는 표면 임피던스 값이 설계와는 다른 주파수에서 발생하게 되어, 정합주파수와 피크 값이 변화하게 된다.

하지만 이러한 영향에도 제안된 CA-RAS는 350°C 온도까지 설정 주파수 대역에서 4 GHz 이상의 -10 dB 흡수 대역과 -20 dB 이상의 피크 값을 갖는 전자파 흡수 성능이 확인된다.

자유공간 측정 장비를 이용하여 열 수분 환경 노출 전/후의 전자파 흡수 성능을 측정했다. 측정 결과는 Fig. 12와 같다.

측정 결과, 열 수분 환경 노출 전과 후 각각 4.2 GHz 이상, 4 GHz 이상의 -10 dB 흡수 대역을 갖는다. 피크 값은 노출 전 후로 각각 -34.1 dB, -34.3 dB이다. 설정 주파수 대역에서 흡수 성능의 평균 값은 각각 -18.6 dB, -18.9 dB이다.

열 수분 환경 노출 전 후로 피크 값의 크기 및 위치의 변화가 매우 적었기 때문에 흡수 성능 저하 및 전자기 물성 변화는 없는 것으로 판단된다. 흡수 성능에 영향을 주는 두께, 복소유전율, 카본잉크의 저항이 변할 시 흡수 피크 값의 위치나 크기가 변화하게 된다. 하지만 본 연구에서 제안된 CA-RAS의 경우, 열 수분 환경 노출 후에도 피크 값의 크기는 0.2 dB 수준 차이가 발생되었으며, 피크 값의 위치 변화는 확

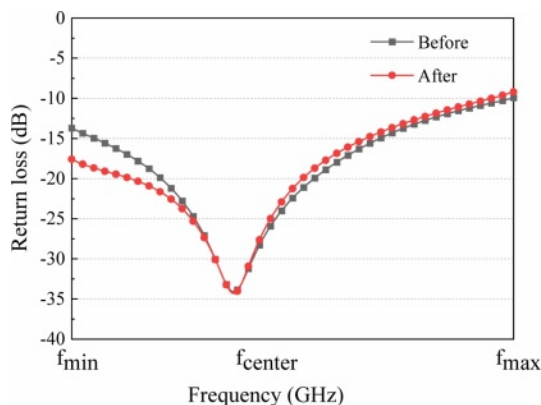


Fig. 12. Return loss of CA-RAS after exposure of hot-wet condition

인되지 않았다. 주파수의 경계 부분인 f_{\min} 과 f_{\max} 부근에서 일부 흡수 성능의 변화가 확인되었다. 이는 측정 시스템을 매뉴얼로 Calibration에 의한 후면 에러로 추정된다. 또한 -10 dB 이하 값에서의 변화이기 때문에 민감하게 반응한 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통해 본 연구에서 제안한 고온용 전자파 흡수 구조는 열 수분 환경 노출 후에도 신뢰성 있는 전자파 흡수 성능이 기대된다.

3.3 고온 및 열 수분 노출 후 인장 물성

본 연구에서는 제안된 CA-RAS의 고온 환경 및 열 수분 환경에서의 구조적 신뢰성을 검증하기 위해 Glass/cyanate ester 복합재의 350°C 고온 인장 시험과 CA-RAS의 열 수분 환경 노출 후의 인장 시험이 수행되었다. Fig. 13은 Glass/cyanate ester와 CA-RAS의 인장 시험 결과를 보여준다.

Glass/cyanate ester의 상온 인장 강도는 397.4 ± 6.8 MPa이며, 350°C 고온 환경에서의 인장 강도는 376.4 ± 11.5 MPa이다. 350°C 환경에서 5.3% 인장 강도 감소가 확인된다. 열 수분 환경 노출 전 CA-RAS의 상온 인장 강도는 409.2 ± 12.75 MPa이며, 열 수분 환경 노출 후 인장 강도는 380.0 ± 9.1 MPa이다. CA-RAS의 상온 인장 강도는 모 재료가 되는 Glass/cyanate ester와 비교하여 3% 이내의 차이 밖에 확인되지 않았으며, 열 수분 환경 노출 후의 CA-RAS의 인장 강도는 4.4% 감소한 결과가 확인되었다.

고온 및 열 수분 환경에서의 인장 강도 저하는 유리섬유의 강도 저하와 섬유/레진 간의 계면 결합력 약화에 기인한다. 기존 문헌에 따르면 고온 환경에서는 유리섬유의 제조 시 내재되어 있던 미세 결함이 전파되어 유리섬유의 강도 저하를 야기하는 것으로 알려져 있다[9]. 또한 열 수분 환경에서는 유리섬유 내의 나트륨이 수분과 반응하여 유리섬유의 실리카 결합을 끊는 촉매로 작용하고, 강도 저하를 야기하는 것으로 알려져 있다[10].

섬유/레진의 계면 결합력의 경우, 고온 환경에서는 섬유와 레진의 열 팽창률 차이에 의해 계면 결합력이 약화된다. 따라서 고온에서는 섬유와 레진 간의 간격이 벌어지게 되

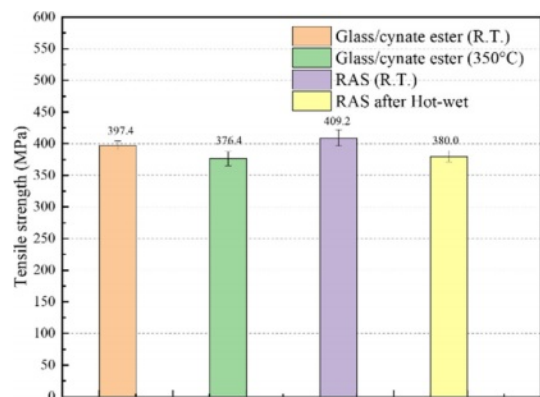


Fig. 13. Tensile strength of glass/cyanate ester composite at 350°C and CA-RAS after exposure of hot-wet condition

고, 계면 결합력이 약화된다. 열 수분 환경에서는 섬유의 계면 결합력 증가를 위해 적용된 실란 코팅이 수분과 반응하여 계면 결합력을 약화시키는 것으로 알려져 있다[7,8]. 이러한 일반적인 유리섬유 복합재료의 특성에 의해 환경 노출 후 소폭의 인장강도 저하가 발생된 것으로 추정된다.

하지만 본 연구에서 사용된 Glass/cyanate ester 소재는 350°C 환경에서 상온 물성 대비 95% 수준의 인장 강도를 가지며, 이를 통해 구현된 고온용 CA-RAS의 경우에는 인장 물성의 저하가 확인되지 않았다. 또한 열 수분 환경 노출 후에도 95% 이상의 인장 강도를 가짐을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 고온용 RAS는 기본 소재의 상온 물성 대비 95% 이상의 기계적 물성이 예상되며, 하중 지지 구조물로서 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온용 Circuit-analog 타입의 전파흡수구조를 제안하고, 적용성 관점에서 고온 환경 및 열 수분 환경에서의 전파흡수 성능 및 인장 물성을 평가하였다. 제안된 고온용 전파흡수구조는 350°C의 고온까지 4 GHz 이상의 -10 dB 흡수 대역과 -20 dB 이상의 피크 값의 전파흡수 성능을 보였으며, 열 수분 환경 노출 후에도 전파 흡수 성능의 저하가 확인되지 않았다. 또한 350°C 및 열 수분 환경 노출 후에도 CA-RAS를 구성하는 복합재의 상온 인장강도 대비 95% 이상의 인장강도 값을 갖는다. 이러한 결과를 통해 본 연구에서는 제안한 고온용 CA-RAS의 고온 및 열 수분 환경에 노출되는 저피탐 구조물로서의 적용 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 초음속 스텔스 비행체 설계기술 개발 과제로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Domingo, R., "Corrosion Control for Aircraft," *Federal Aviation Administration*, 2018.
2. Yuan, X., Cheng, L., and Zhang, L., "Influence of Temperature on Dielectric Properties and Microwave Absorbing Performances of TiC Nanowires/SiO₂ Composites," *Ceramics International*, Vol. 40, No. 10, 2014, pp. 15391-15397.
3. Kong, L., Yin, X., Han, M., Zhang, L., and Cheng, L., "Carbon Nanotubes Modified with ZnO Nanoparticles: High-efficiency Electromagnetic Wave Absorption at High-temperatures," *Ceramics International*, Vol. 41, No. 3, 2015, pp. 4906-4915.
4. Luo, H., Tan, Y., Li, Y., Xiao, P., Deng, L., Zeng, S., Zhang, G., Zhang, H., Zhou, X., and Peng, S., "Modeling for High-temperature Dielectric Behavior of Multilayer C₆₀/Si₃N₄ Composites in X-band," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 37, No. 5, 2017, pp. 1961-1968.
5. Yuchang, Q., Qinlong, W., Fa, L., and Wancheng, Z., "Temperature Dependence of the Electromagnetic Properties of Graphene Nanosheet Reinforced Alumina Ceramics in the X-band," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 4, No. 22, 2016, pp. 4853-4862.
6. Hilario, M.S., Hoff, B.W., Jawdat, B., Lanagan, M.T., Cohick, Z.W., Dynys, F.W., Mackey J.A., and Gaone, J.M., "W-Band Complex Permittivity Measurements at High Temperature Using Free-Space Methods," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 9, No. 6, 2019, pp. 1011-1019.
7. Sethi, S., and Ray, B.C., "Environmental Effects on Fibre Reinforced Polymeric Composites: Evolving Reasons and Remarks on Interfacial Strength and Stability," *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 217, 2015, pp. 43-67.
8. Davis, A.K., *Influence of Surface Treatment and Humidity on Strength of E-glass Fiber Bundles*, Master's Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, US, 1999.
9. Feih, S., Manatpon, K., Mathys, Z., Gibson, A.G., and Mouritz, A.P., "Strength Degradation of Glass Fibers at High Temperatures," *Journal of Materials Science*, Vol. 44, 2009, pp. 392-400.
10. Jones, F.R., and Foreman, J.P., "The Response of Aerospace Composites to Temperature and Humidity," *In Polymer Composites in the Aerospace Industry*, 2015, pp. 335-369.
11. Knott, E.F., Schaeffer, J.F., and Tulley, M.T., *Radar Cross Section*. Scitech Publishing, 2004.
12. Choi, K.S. Sim D.Y., Choi, W.H., Shin, J.H., and Nam, Y.W., "Ultra-high Temperature EM Wave Absorption Behavior for Ceramic/Sendust-aluminosilicate Composite in X-band," *Composites Research*, Vol. 35, No. 3, 2022, pp. 201-215.
13. Varadan, V.V., Hollinger, R.D., Ghodgaonkar, D.K., and Varadan, V. K., "Free-space, Broadband Measurements of High-temperature, Complex Dielectric Properties at Microwave Frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, No. 5, 1991, pp. 842-846.
14. ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
15. MIL-STD-810H, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, U.S. Department of Defense, Washington, DC, USA, 2019.
16. ASTM D5229-20, Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
17. ASTM D618-21, Standard Test Method for Conditioning Plastics for Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
18. Debye, P., *Polar Molecules*, The Chemical Catalog Company, Inc., New York, 2004.
19. Correia, N.T., and Ramos, J.J.M., "On the Cooperativity of the β -relaxation: A Discussion Based on Dielectric Relaxation and Thermally Stimulated Depolarisation Currents Data," *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 2, No. 24, 2000, pp. 5712-5715.